

다축 구조 S-2 유리섬유 복합재의 충격 특성

송승욱*·이창훈*·변준형*·황병선*·엄문광*·이상관*

Impact Properties of S-2 Glass Fiber Composites with Multi-axial Structure

S-W Song*, C-H Lee*, J-H Byun*, B-S Hwang*, M-K Um*, S-K Lee*

Abstract

For the damage tolerance improvement of conventional laminated composites, stitching process have been utilized for providing through-thickness reinforcements. 2D preforms were stacked with S-2 glass plain weave and S-2 glass MWK (Multi-axial Warp Knit) L type. 3D preforms were fabricated using the stitching process. All composite samples were fabricated by RTM (Resin Transfer Molding) process. To examine the damage resistance performance the low speed drop weight impact test has been carried out. For the assessment of damage after the impact loading, specimens were examined by scanning image. CAI (Compressive After Impact) tests were also conducted to evaluate residual compressive strength. Compared with 2D composites, the damage area of 3D composites was reduced by 20-30% and the CAI strength showed 5-10% improvement.

Key Words: S-2 glass, Stitching, 3D composites, Impact, CAI, Damage area.

1. 서 론

고분자 복합재는 비강도 및 비강성이 우수하고 경량화가 가능하기 때문에 그 사용 범위가 넓어지고 있으며, 특히 항공 우주용 구조물로서 많은 연구와 개발이 이루어지고 있다.

그러나 기존의 2D 적층 복합재의 경우 층간 결합력이 약하기 때문에 다양한 하중이 작용하는 1차 구조물로서는 그 사용이 매우 제한적이다. [1-3] 이러한 단점을 극복하기 위한 가장 효과적인 방법은 두께 방향으로 섬유를 보강한 3D 복합재료의 사용이며 이에 대한 연구와 개발이 활발히 진행되고 있다.

두께 방향 섬유의 보강은 주로 3D 직조에 의해 얻어지며, 제조 기술로는 3D weaving, 3D

braiding, knitting, needle punching, stitching (스티칭) 등이 있으며, 이러한 방법 중 비교적 손쉽게 3D 복합재를 제조할 수 있는 기술로 두께 방향 섬유를 기계를 이용하여 직접 삽입하는 스티칭 기술이 대표적이다.[4]

다양한 형태의 프리폼 구조 중 평직 구조가 섬유다발 간의 interlocking으로 인하여 충격이 가해질 때 크랙이나 층간분리 전파가 많이 일어나지 않기 때문에 충격 후 손상이 적다고 알려져 있다. 그러나 일방향 복합재료가 여러 방향으로 적층된 구조는 비록 손상면적은 평직에 비하여 크더라도 섬유굴곡이 없기 때문에 충격 후 강도 면에서는 더 유리할 수도 있다. 따라서 복합재료의 충격특성을 전체적으로 평가하기 위해서는 충격 에너지 흡수, 손상면적, CAI 특성 등 여러 면에 대한 고려가 필요하다.

본 논문에서는 S-2 유리섬유를 사용한 다양한 보강 구조를 가지는 복합재료의 충격특성을 상호 비교하였다. 비교를 위한 기준 재료 (baseline

* 한국기계연구원 복합재료 그룹

material)로서 2D 적층구조인 평직과 일방향으로 직조된 다축경편 (L-type MWK, Multi-axial Warp Knit) 을 고려하였고 3D 복합재료 시편은 위의 직물을 적층한 프리폼을 스티칭한 형태의 섬유구조이다.

충격 시험 후 시편은 각각의 파손부위를 측정, 비교하였으며, CAI 시험을 통하여 잔류 압축강도를 구하고, 보다 정량적인 분석을 위하여 충격시험 전 시편의 압축강도와 비교하였다.

2. 시편 제조 및 시험

2.1 시편 제조

본 연구에서 사용한 보강재는 S-2 유리섬유 평직과 L형 다축경편직물이며 두께 방향 스티칭 섬유로는 케블라 섬유를 사용하였다.

일방향 다축경편직물의 적층순서는 $[0/90]_{2s}$, $[0/45/90/-45]_s$ 의 두 가지 형태로 하였으며, 동일한 두께를 위하여 평직의 경우 5장 적층하였다. 기지재는 에폭시 수지를 사용하였으며 수지충전 성형법 (RTM) 으로 제조하였다.

3D 복합재는 적층된 프리폼에 스티칭 기계 (Fig. 1) 를 이용하여 스티칭 한 후, 2D 복합재와 동일한 방법으로 제조하였다. 본 연구에 적용된 스티칭 방법은 lock 스티칭으로서 보빈 실과 니들 실이 만나는 루프가 시편 두께의 중앙에 위치하는 형태이다. 스티칭 밀도는 폭 방향, 길이 방향 모두 10mm로 고정하였다.

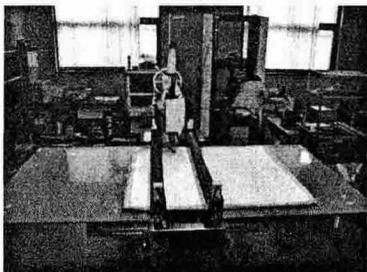


Fig. 1 Stitching machine.

2.2 미세 조직 관찰

스티칭 섬유의 배열 상태를 확인하기 위하여 광학현미경으로 3D 시편의 단면을 촬영하였다. Fig. 2 (a)는 평직 적층구조에 스티칭을 한 것인데 두께방향 단면에서 평직 섬유의 굴곡을 볼 수

있다. Fig. 2 (b)는 L형 다축경편을 직교 배열한 것으로서 평직 구조와는 달리 적층 섬유의 배열이 직선을 보임을 알 수 있다. 본 연구에서 사용한 lock 스티칭은 보빈 실과 니들 실이 중간에서 만나는 Fig. 2 (b)의 형태가 일반적이나 니들 실의 장력을 적당히 조절함으로써 Fig. 2 (a)나 (c)와 같이 두 섬유의 만남이 한 쪽 면에 오는 경우도 있게 된다. 이런 형태를 modified lock 스티칭이라고 한다. 본 연구에서는 이 두가지 형태의 스티칭을 구별하지 않고 사용하였다.

Fig. 2 (c)는 L형 다축경편을 준등방 배열한 것이다. 여기에서도 각 층의 섬유배열이 직선임을 알 수 있으며 이 단면에서의 스티칭 형태는 modified lock 스티칭이다.



(a) Plane weave



(b) MWK-L $[0/90]_{2s}$



(c) MWK-L $[0/45/90/-45]_s$

Fig. 2 Microstructure of 3D composites.

2.3 충격시험 및 충격 후 압축시험

제조된 복합재의 충격특성을 평가하기 위해 SACMA SRM 2R-94를 참조하여 저속충격시험 (low velocity impact test) 을 하였다. 에너지 레벨은 20J, 25J, 30J, 35J의 네 가지로 하였고, 시편에 가해진 에너지는 일정 무게를 가진 충격자의 높이로 조절하였다. Fig. 3은 충격시험에 사용한 데이터 처리장치와 낙추 충격시험 장치를 보여주고 있으며, 충격자의 무게는 7.96kg, 지름 15.75mm의 반구형 팁을 사용하였다.

충격시험 후 시편의 파손부위를 확인하기 위하여 시편을 직접 밝은 빛에 투사하는 방법을 사용

하였으며, 충격 후 복합재료의 압축 특성을 평가하기 위해 충격 후 압축 (CAI) 시험을 하였다. 시편은 Boeing BSS 7260의 시험장치에 고정시켰으며, Shimadzu 사의 AG-10TE (10ton) 에서 분당 1mm의 속도로 시험하였다.

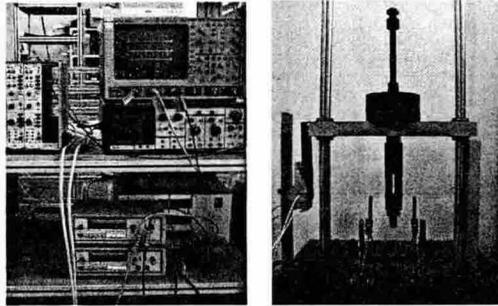


Fig. 3 SACMA test fixture.

3. 결과 및 고찰

3.1 압축강도

복합재의 충격 후 잔류강도를 정량적으로 평가하기 위해서 충격을 가하지 않은 시편의 압축시험을 하였다. Table 1은 각 시편의 압축강도 및 압축강성을 나타낸 것이며 MWK ORT는 [0/90]_{2s} 시편, MWK ISO는 [0/45/90/-45]_s 시편이다. 표에서 볼 수 있듯이 2D 복합재의 압축강도가 3D 복합재보다 약간 높게 나온 것을 알 수 있는데, 이는 스티칭으로 인한 섬유 굴곡과 스티치 섬유 주위의 수지과다 때문으로 생각된다. MWK ISO의 경우 강도 값이 다른 시편에 비해 상대적으로 낮은 것을 알 수 있는데 이는 길이 방향 섬유의 양이 다른 프리폼 구조에 비해 적기 때문이다.

Table 1. Compressive test results

Type		Max load (kN)	Strength (MPa)	Modulus (GPa)
2D	Plain weave	36.0	379	24.7
	MWK ORT	20.2	543	24.9
	MWK ISO	26.1	286	19.9
3D	Plain weave	32.5	329	20.6
	MWK ORT	48.2	466	23.9
	MWK ISO	29.9	296	25.0

3.2 파손 부위 측정

Fig. 4는 충격시험 후 시편의 파손 부위를 보여

주고 있는데, 평직시편과 MWK ORT 시편의 경우 섬유의 직조형태로 인하여 파손 부위가 0도 90도 방향으로 퍼져있는 것을 알 수 있으며, MWK ISO 시편의 경우 다른 시편과는 다르게 45도 방향으로도 퍼져있는 것을 알 수 있다. 파손 크기는 2D 복합재에 비해 3D 복합재의 파손 부위가 작은 것을 알 수 있는데, 그 이유는 두께방향의 스티칭 섬유로 인하여 층간분리가 억제되었기 때문이다.

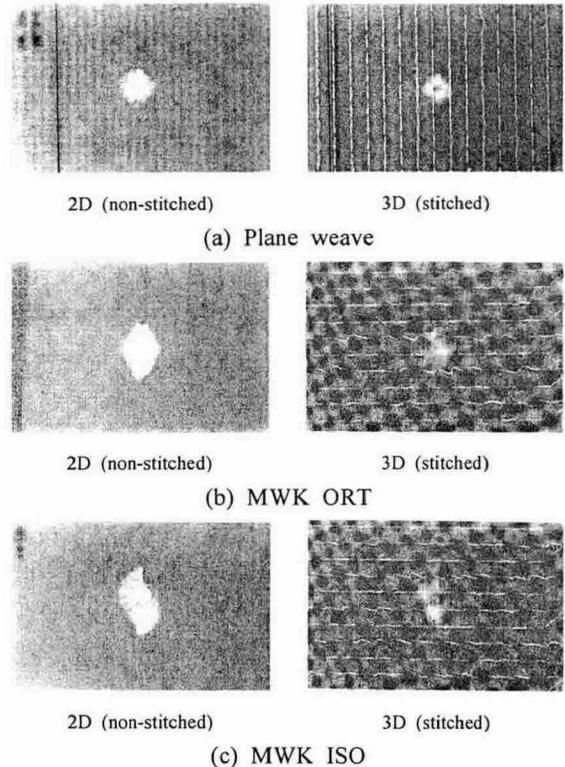


Fig. 4 Scanning results of specimens.

3.3 충격특성

Fig. 5는 시간에 대한 충격에너지 변화를 보여주는 곡선이다. 충격 완료 시점에서의 에너지는 손실에너지로서 시편에 흡수된 충격에너지를 나타낸다. 그래프에서 보면 2D와 3D 복합재 사이의 손실 에너지 차이는 충격에너지의 양이 커질수록 3D 복합재가 약간 크다는 것을 알 수 있는데, 충격에너지가 층간분리와 함께 두께방향의 스티칭 섬유로도 흡수되었기 때문이다. MWK ISO는 높은 에너지 레벨 (35J) 의 경우 다른 시편에 비해 흡수된 에너지가 많은데 이는 섬유 배열

의 차이로 인한 것으로 판단된다.

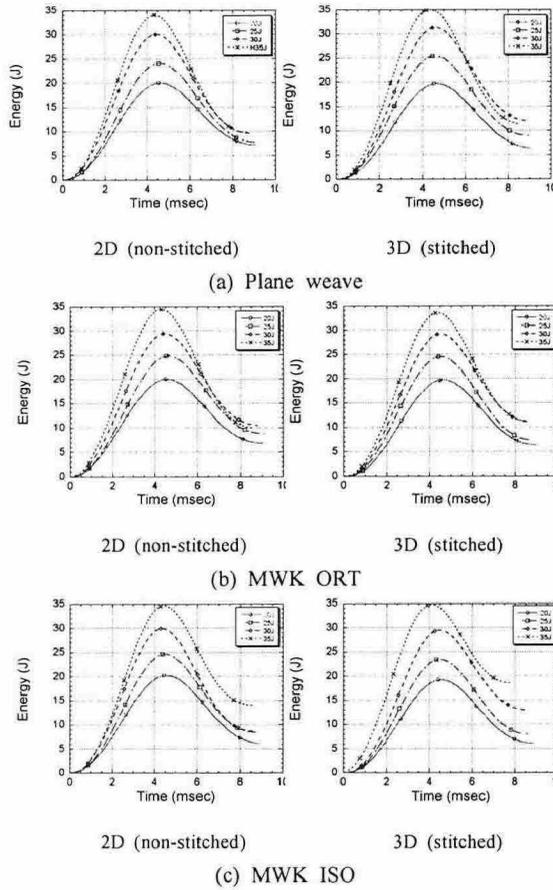


Fig. 5 Energy vs. time curves.

Fig. 6와 7은 20J에 대한 2D 및 3D 복합체의 하중-시간과 하중-변위곡선을 나타낸 것이다. Fig. 6을 보면 2D 복합체와 3D 복합체 모두 하중 변화의 폭이 크지 않은 것을 알 수 있는데 S-2 유리섬유 자체의 충격에너지 흡수 능력이 우수하기 때문이다. Fig. 7에서는 시편의 잔류변형을 비교할 수 있는데 3D 복합체의 흡수에너지가 2D 보다 크어도 불구하고 잔류변형은 크게 차이가 나지 않는데 그 이유는 충격에너지가 층간 분리 및 스티칭 섬유로 흡수되었기 때문에 구조적 변형에는 큰 영향을 주지 않았기 때문이다.

Table 2는 네 가지 충격에너지를 가했을 때 2D 복합체와 3D 복합체의 충격시험 결과를 모두 정리한 것이다. 파손 면적의 경우 3D 복합체가

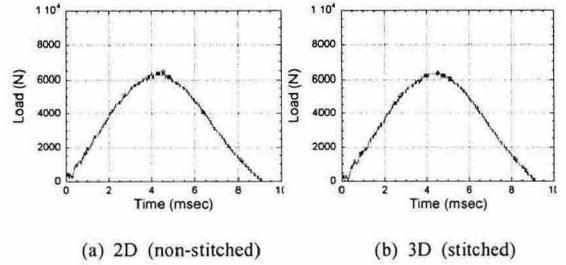


Fig. 6 Load vs. time curves: Plain weave; 20J.

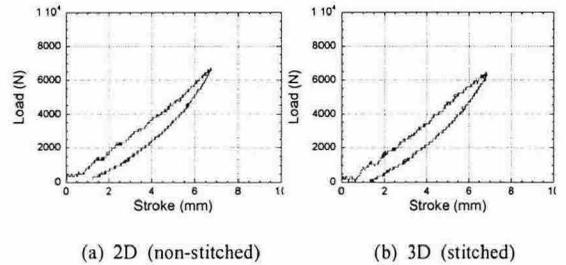


Fig. 7 Load vs. displacement curves: Plain weave; 20J.

Table 2. Impact test results of 2D and 3D composites

Type	Impact energy per unit thickness (J/mm)	Absorbed energy per unit thickness (J/mm)	Damage area (mm ²)	Residual compressive strength (MPa)	
2D	Plain weave	5.09	1.779	380(±34)	154.1(±6)
		6.37	1.902	398(±23)	159.8(±6)
		7.50	2.02	496(±61)	134.7(±8)
		8.65	2.57	456(±80)	153.4(±7)
	MWK ORT	5.35	1.879	496(±9)	147.1(±4)
		6.82	2.27	531(±48)	138.7(±23)
		7.93	2.86	565(±53)	137.5(±10)
		9.16	2.92	649(±50)	132.4(±6)
	MWK ISO	5.24	1.540	697(±48)	132.1(±10)
		6.51	2.19	798(±43)	129.5(±7)
		7.58	2.44	895(±54)	123.9(±4)
		8.97	3.63	1079(±158)	115.2(±5)
3D	Plain weave	5.02	1.614	274(±32)	161.7(±3)
		6.53	2.20	380(±30)	167.7(±6)
		7.87	3.10	487(±68)	150.7(±11)
		8.55	2.39	494(±82)	143.7(±4)
	MWK ORT	4.76	1.705	364(±29)	142.7(±11)
		5.87	1.702	431(±22)	147.9(±8)
		7.07	2.83	487(±15)	132.8(±1)
		8.28	3.07	475(±21)	134.7(±6)
	MWK ISO	4.78	1.334	588(±17)	166.6(±28)
		5.80	1.703	717(±27)	160.7(±15)
		7.38	2.45	794(±110)	129.5(±8)
		8.68	4.36	835(±52)	150.7(±37)

20~30% 감소한 것을 알 수 있는데, 그 이유는 두께방향 섬유유로 인하여 층간분리가 억제되었기 때문이다. 또한 2D 복합재와 3D 복합재의 잔류 압축강도를 비교해보면 3D 복합재가 전반적으로 약 10% 향상된 것을 알 수 있다. 이 역시 스티칭 섬유유의 효과로 인하여 시편의 파괴가 줄었기 때문으로 판단된다.

3.4 스티칭 효과

Fig. 8은 충격시험 전-후의 압축시험 결과에 따라 2D 및 3D 복합재의 압축강도 손실을 계산하고, 스티칭 효과를 비교한 것이다. 여기서 보는 바와 같이 스티칭을 함으로서 강도가 전반적으로 향상되는 것을 볼 수 있다. Fig. 9는 각 시편에 대하여 손상면적을 단위 두께 당 시편에 가해진 에너지로 나눈 값으로서 각 에너지 레벨에 대한 값을 평균한 것이다. 막대그래프 위에 표시한 선은 표준편차를 나타낸 것이다. 이 그래프는 에너지 크기에 관계없이 단위 에너지에 대한 복합재료의 손상크기를 보여주는 것으로서 각 재료의 충격저항을 직접 비교할 수 있다. 여기서 보는 바와 같이 스티칭을 함으로서 파손 면적이 전반적으로 감소하는 것을 볼 수 있으며 평직 시편의 파손 면적이 가장 작은 것을 알 수 있다.

4. 결론

S-2 유리섬유를 이용한 2D 복합재와 스티칭 기술을 적용한 3D 복합재의 충격특성에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 2D 복합재와 3D 복합재의 충격 전 압축 특성은 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 MWK ISO의 경우 가장 낮은 값을 보였는데 이는 길이 방향 섬유유의 양이 상대적으로 적기 때문이다.
- (2) 3D 복합재의 흡수에너지가 2D 보다 크어도 불구하고 잔류변형은 크게 차이가 나지 않았다. 그 이유는 충격에너지가 층간 분리 및 스티칭 섬유유로 흡수되어서 구조적 변형에는 큰 영향을 주지 않았기 때문이다.
- (3) 충격 후 파손 부위는 3D 복합재가 약 20-30% 감소하였다. 스티칭에 의해 충격 후 압축강도가 모든 프리폼 형태에 대하여 전반적으로 향상되었으며 (약 5-10%), 그 중 평직 시편의 강도 값이 가장 높은 것으로 나타났다.

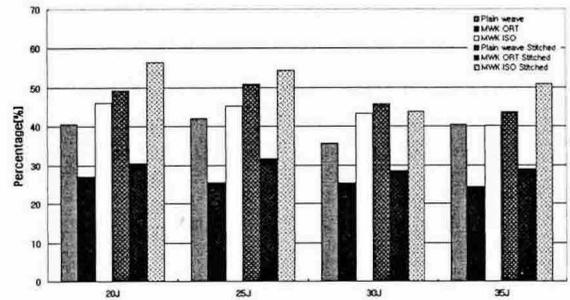


Fig. 8 Comparison of stitching effect.

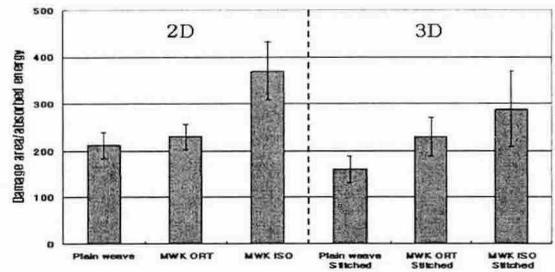


Fig. 9 Damage area comparison.

후기

본 연구는 21C 프론티어 사업 (차세대 소재성형 기술 개발사업)과 기본연구사업의 연구비 지원으로 이루어 졌습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) A. P. Mouritz, K. H. Leong and I. Herszberg, "A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre reinforced polymer composites", Composite Part A, 28A, 1997, pp. 979~991.
- (2) G. A. Schoepner and S. Abrate, "Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates", Composites: Part A, 31, 2000, pp. 903-915.
- (3) M. V. Hosur, M. Abdullah and S. Jeelani, "Studies on the low-velocity impact response of woven hybrid composites", Composite Structures, Volume 67, Issue 3, 2005, pp. 253~262
- (4) J. H. Byun and T. W. Chou, "Mechanics of textile composites", Comprehensive Composite Material, A. Kelly and C. Zweben(Eds), Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands, Vol. 1, Chapter 22, 2000, pp. 719~761.